



# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

**“INFLUENCIA DEL PH, GRANULOMETRÍA Y LA  
CONCENTRACIÓN DEL ÁCIDO CÍTRICO EN LA LIXIVIACIÓN  
POR AGITACIÓN DE MINERALES SULFATOS DE COBRE”**

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de minas

Autores:

Kathia Milagritos Sánchez Cipriano  
Alejandro Milton Villanueva Sánchez

Asesor:

Dr. Ing. Juan Vega González

Cajamarca - Perú

2019

## DEDICATORIA

En primer lugar, dedico este trabajo a Dios por darme sabiduría, salud y amor; y tomar mis planes y proyectos en sus manos.

A mis padres César y Lili Ana por su amor y apoyo incondicional.

A mis hermanos Mónica, Carlos, Luis y Diego por sus consejos y buenos deseos.

Al ingeniero Juan Vega Gonzáles por su orientación para llegar a culminar esta etapa académica.

***Kathia Milagritos***

En primer lugar, dedico este trabajo a Dios por concederme la vida, salud y amor; y sobretodo guiarme en mi caminar.

A mis padres por haberme educado y hacer de mí una persona de bien para cumplir con mis objetivos.

A mis pequeñas Lía y Luna, mis dos grandes inspiraciones para seguir adelante.

Al ingeniero Juan Vega González por su ejemplo y guía para concluir con esta etapa académica.

***Alejandro Milton***

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por sus bendiciones que me permitieron lograr mi meta profesional.

A mis padres por haberme inculcado buenos principios y valores.

A mis hermanos por su apoyo desinteresado que sirvieron de mucho para mi superación.

Al ingeniero Juan Vega González por su asesoramiento para la elaboración de este trabajo.

A nuestra alma mater la Universidad Privada del Norte, a los catedráticos de la facultad de ingeniería por sembrar en nosotros sus buenos conocimientos y enseñanzas a lo largo de nuestra carrera profesional.

***Kathia Milagritos***

Agradezco primeramente a Dios por haberme concedido de sus bendiciones para lograr esta gran etapa.

Agradezco a mis padres por haberme brindado su amor y apoyo incondicional para mi etapa profesional.

Agradezco al ingeniero Juan Vega González por su orientación para concluir con éxito este trabajo.

Agradezco a la Universidad Privada del Norte y a sus catedráticos de la facultad de ingeniería por habernos compartido sus grandes conocimientos y hacer de nosotros unos profesionales de éxito.

***Alejandro Milton***

## TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	1
AGRADECIMIENTO .....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Realidad problemática .....	12
1.2. Formulación del problema.....	14
1.3. Objetivos.....	15
1.3.1. Objetivo general .....	15
1.3.2. Objetivos específicos.....	15
1.4. Hipótesis .....	15
1.4.1. Hipótesis general .....	15
1.4.2. Hipótesis específicas.....	16
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA .....	17
2.1. Tipo de investigación .....	17
2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos).....	17
2.2.1. Población .....	17
2.2.2. Muestra .....	17
2.2.3. Materiales .....	19
2.2.4. Instrumentos .....	20
2.2.5. Métodos .....	21
2.2.5.1. Método experimental:.....	21

A.	Diseño experimental .....	21
B.	Equipo experimental .....	24
2.3.	Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos .....	26
2.3.1.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	26
2.3.2.	Técnicas e instrumentos de análisis de datos.....	26
2.4.	Procedimiento .....	27
2.4.1.	Análisis químico del mineral.....	27
2.4.2.	Preparación de la muestra.....	27
2.4.3.	Preparación del mineral con la solución del ácido cítrico .....	28
2.4.4.	Agitación en bancos de celda .....	29
2.4.5.	Filtrado de las muestras .....	30
2.4.6.	Análisis por el ICP-OES y balance metalúrgico .....	30
CAPÍTULO III. RESULTADOS .....		32
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....		39
4.1.	Discusión .....	39
4.2	Conclusiones.....	42
REFERENCIAS .....		44
ANEXOS.....		48

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características físico-químico de la calcantita.....	18
Tabla 2. Composición química del mineral calcantita .....	19
Tabla 3. Propiedades físico-químico del ácido cítrico .....	20
Tabla 4. Factores y niveles para el diseño experimental .....	21
Tabla 5. Diseño experimental del porcentaje de extracción del Cu .....	22
Tabla 6. Desglose de Diseño experimental para el porcentaje de extracción del Cu .....	23
Tabla 7. Parámetros que influyen en la extracción del Cu por lixiviación con ácido cítrico .....	25
Tabla 8. Gramos de ácido cítrico para preparar 200 ml de solución a diferentes concentraciones.....	29
Tabla 9. Parámetros de operación.....	32
Tabla 10. Resultados de porcentaje de extracción de Cu según análisis de ICP-OES y balance metalúrgico .....	33
Tabla 11. Resultados del análisis de varianza para el % de extracción de Cu a diferente pH, concentración molar y granulometría.....	38



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de extracción en función del tiempo. ....	25
Figura 2. Diagrama de bloques del proceso que sigue el sulfato de Cu de tipo calcantita para la preparación de la muestra .....	28
Figura 3. Diagrama de bloques del proceso general que sigue el sulfato de Cu de tipo calcantita para la extracción del porcentaje del Cu.....	31
Figura 4. Gráfica de la curva de variación del porcentaje de la extracción del cobre en función de la granulometría del mineral. ....	34
Figura 5. Gráfica de la curva de variación del porcentaje de la extracción del cobre en función de la concentración molar del ácido cítrico. ....	34
Figura 6. Gráfica de la curva de variación del porcentaje de la extracción del cobre en función de diferentes niveles de pH.....	35
Figura 7. Gráfica de la curva de variación del porcentaje de la extracción del cobre en función de la concentración del ácido cítrico a diferentes niveles de pH.....	35
Figura 8. Gráfica de la curva de variación del porcentaje de la extracción del cobre en función de la granulometría a diferente número de malla y diferentes niveles de pH.....	36
Figura 9. Gráfica de la curva de variación de la extracción de cobre en función de la granulometría a diferente número de malla y diferente concentración molar del ácido cítrico. ....	36

Figura 10. Gráfica de la curva de variación del porcentaje de extracción del cobre en función de la granulometría a diferente número de malla, diferente concentración molar del ácido cítrico y diferentes niveles de pH.....37

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Porcentaje de humedad .....	27
Ecuación 2. Densidad de la pulpa.....	29
Ecuación 3. Porcentaje de sólidos .....	29
Ecuación 4. Porcentaje de extracción de cobre .....	30
Ecuación 5. Contenido de finos de Cu en la solución .....	30
Ecuación 6. Contenido de finos de Cu en la cabeza.....	30

## RESUMEN

La presente tesis realizada en el Laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Trujillo, tuvo por objetivo determinar la influencia que tiene el pH, granulometría y la concentración del ácido cítrico en la extracción de Cu a partir de la calcantita, con un mineral de cabeza de 6,31% Cu.

El método que se utilizó fue la lixiviación por agitación a una velocidad de 275 rpm y un tiempo máximo de 40 minutos por prueba. Utilizamos un diseño experimental que consistió en la variación de las condiciones de pH a 3, 4 y 5 y la concentración de ácido cítrico a 0,3; 0,4 y 0,5 M para las 36 muestras a diferente malla (80% -#20 y 80% - #100). Las muestras fueron filtradas para conseguir cada solución lixiviada y luego ser analizadas en el ICP-OES.

Los resultados fueron positivos a pH igual a 3, granulometría malla #100 y concentración de 0,4 M; logrando un porcentaje de extracción de Cu del 99%. De esta manera se pudo determinar la influencia significativa y no significativa que tienen estas variables en su interacción para la extracción de Cu a partir de la calcantita.

Palabras clave: Lixiviación por agitación, ácido cítrico, Calcantita.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad problemática

Según el Ministerio de Energía y Minas (MEM, 2018) las exportaciones cupríferas ascendieron a US\$ 14925 millones en el 2018, cifra que refleja un crecimiento de 7,8% con relación al año 2017 (US\$ 13846 millones), informó la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE).

El gremio minero energético señaló que las exportaciones de cobre representaron el 30% de los envíos totales del Perú, que llegaron a US\$ 48942 millones el año pasado.

Cabe notar el gran aumento de productividad por parte de las empresas mineras y a la vez la implementación de materiales y amplificación de costos para la recuperación del cobre.

Durante las últimas décadas se busca nuevas alternativas en los procesos hidrometalúrgicos ya que el más utilizado hasta la actualidad es la lixiviación de minerales oxidados de cobre con ácido inorgánico como el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) como solución lixivante, utilizando en promedio 100 g/L de  $H_2SO_4$  y a  $pH < 5$  donde se recupera el 85% de cobre (Chucos y Espinoza, 2016, p. 15). Debido a la utilización de este ácido el resultado del procedimiento se ve altamente tóxico y contaminante. Una alternativa de solución es cambiar el uso de estos ácidos inorgánicos por orgánicos y biodegradables como el ácido cítrico.

Algunas propiedades del cobre tales como su conductividad térmica y su resistencia a la corrosión, dependen de su pureza, y ésta a su vez del tipo de proceso por el que se ha

extraído de sus menas. Por lo tanto, es importante disponer de un proceso limpio de extracción de cobre (Günter, 2001).

Espinosa y Ludeña, (2007), realizaron investigaciones sobre solubilizar minerales oxidados de cobre con ácido cítrico mediante la lixiviación por agitación, donde los resultados fueron que el ácido cítrico solubiliza al cobre. Este procedimiento no daña el medio ambiente, produciendo en el proceso de lixiviación un citrato de cobre (sal formada por la reacción de óxido de cobre o sulfato de cobre en ácido cítrico).

Lingan y Lucano, (2014), mencionan que según el diagrama de Pourbaix para el sistema  $\text{Cu} - \text{H}_2\text{O}$  demuestra que la calcantita se forma a pH ácido. Una proporción de acidez del lixivante varía entre un pH de 1.0 y 5.0, rango en donde se forma el citrato de cobre, por lo que se decide trabajar a pH 3, 4 y 5.

Chucos y Espinoza, (2016), Concluyen que “El tamaño de partículas debe ser menor a 2mm, pero no deben tener exceso de finos (menos de 40% < 75 micrones) ya que dificultan la separación sólido líquido” (p. 37).

Medina, J., (2016), indica que para disminuir los consumos de energía por concepto de molienda y los costos de filtración y decantación, la agitación se deberá tratar de realizar a la mayor granulometría que la operación lo permita

Lingan y Lucano, (2014), Concluyen que a una concentración de 0.4 Molar se obtiene un mayor porcentaje de extracción y según sus recomendaciones consideran que se deben hacer pruebas a niveles de concentración entre los rangos de 0.3 M y 0.5 M.

Domic, (2001), el tiempo para la disolución completa de la calcantita en la lixiviación por agitación es de segundos a minutos. Por lo tanto, en este estudio consideramos un tiempo máximo de 40 minutos por prueba.

Córdova y Campos, (2016), La velocidad de agitación deberá ser lo suficientemente alta para mantener los sólidos en suspensión, para que no decanten. La velocidad que consideramos es de 275 rpm.

En tesis de pregrado se demostró que para realizar las pruebas experimentales es necesario hacer el uso de un método experimental, cuyo diseño es factorial de múltiples niveles. Tomando en cuenta dicho método obtenemos 36 pruebas experimentales (18 para malla #20 y 18 para malla #100)

Atendiendo entonces a las necesidades de lixiviar minerales con contenido de cobre y disminuir la contaminación del medio ambiente por el uso de agentes lixiviantes inorgánicos y a la vez mantener o aumentar el porcentaje de extracción, es que en este estudio se pretende evaluar la extracción de cobre a partir de un mineral tipo calcantita mediante la concentración del ácido cítrico, la granulometría del mineral y el pH, al cual se pueda obtener la mayor extracción de cobre.

## **1.2. Formulación del problema**

¿En qué medida influye el pH, granulometría y la concentración del ácido cítrico en la extracción de cobre mediante lixiviación por agitación para un mineral tipo calcantita?

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Determinar el porcentaje de extracción de cobre mediante lixiviación por agitación variando la concentración del ácido cítrico, en diferentes pH y granulometría del mineral calcantita.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Determinar la influencia de la concentración de ácido cítrico en la extracción de cobre mediante lixiviación por agitación de minerales de sulfatos de cobre del tipo calcantita.
- Determinar la influencia de la granulometría en la extracción de cobre mediante lixiviación por agitación de minerales de sulfatos de cobre del tipo calcantita.
- Determinar la influencia del pH en la extracción de cobre mediante lixiviación por agitación de minerales de sulfatos de cobre del tipo calcantita.
- Analizar la interacción de las variables causa-efecto en la extracción del sulfato de cobre del tipo calcantita.

### **1.4. Hipótesis**

#### **1.4.1. Hipótesis general**

Se obtiene mayor porcentaje de extracción de cobre a partir de la calcantita a una mayor concentración molar, menor pH y menor tamaño de partícula.



#### 1.4.2. Hipótesis específicas

- A un menor pH se obtiene una mayor extracción de cobre a partir de la calcantita.
- A un menor tamaño de partícula se obtiene una mayor extracción de cobre a partir de la calcantita.
- A una mayor concentración molar se obtiene una mayor extracción de cobre a partir de la calcantita.
- Los efectos de las variables pH, concentración molar, granulometría; interacción de las variables pH y concentración molar, pH y granulometría; influyen significativamente, mientras que la interacción de las variables concentración molar y granulometría e interacción de las tres variables no influyen significativamente en el porcentaje de extracción del Cu a partir de la calcantita.

## **CAPÍTULO II. METODOLOGÍA**

### **2.1. Tipo de investigación**

Esta investigación según el propósito es aplicada porque utilizamos los conocimientos en la práctica. Dicha investigación es de tipo experimental para mostrar básicamente la relación causa-efecto, donde las variables independientes (causa) modifica la variable dependiente (efecto). (Tam, Vera y Oliveros, 2008).

Este tipo de investigación está formado por 3 variables independientes y 1 variable dependiente.

### **2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)**

#### **2.2.1. Población**

La población lo constituyó el mineral de sulfato de cobre de la Mina Huanzala, zona El Recuerdo y zona Carlos Alberto ubicada en el distrito de Huallanca, provincia de Bolognesi, departamento de Ancash. (Alejos, Cáceres y Neire, 2017).

#### **2.2.2. Muestra**

El tipo de muestreo utilizado fue el de Aleatorio simple. Consiste en que se toman muestras distribuidos al azar en intervalos de tiempo y/o espacio variable. (Alfaro, 2002)

Según el estudio de Cordova y Campos (2016) trabajaron con una muestra de 15 kg de mineral, y según el diseño trifactorial que tenemos se considera 36 pruebas con 100 g de mineral para cada prueba haciendo un total de 3.6 Kg, sin embargo para efecto de representatividad se muestreó en la zona de Huanzala la cantidad de 15 kg

a una granulometría de 80% menor a 1 pulgada, muestras de calcantita (mineral del grupo VI de los sulfatos) (tabla 1), siendo su composición química  $\text{Cu}(\text{SO}_4) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  se muestra en la tabla 2.

La muestra de estudio presenta una ley de cobre de 6.37% y un porcentaje de humedad del 60%, dado que está mezclado con otros minerales.

Tabla 1.

*Características físico-químico de la calcantita*

Fórmula	$\text{Cu}(\text{SO}_4) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Dureza	2.5
Masa molecular	249,69 g/mol
Color	Azul
Color De La Raya	Blanco
Brillo	Vitrio, Translucido
Cristales	Laminar
Fracturamiento	Irregular
Sistema Cristalino	Triclínico
Origen	Hidrotermal, Vetas
Densidad	2,28
Óptica	Biáxico Negativo

Elaboración: Fuente propia

Tabla 2.

*Composición química del mineral calcantita*

CuO	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O
31.40%	32.13%	0.76%	35.90%

Elaboración: **KLEIN C., HURLBUT C. S. JR.** Manual de mineralogía, 4ªed. Tomo II. Reverté, **1997**

**2.2.3. Materiales**

Para llevar a cabo este proyecto de tesis se utilizó lo siguiente:

**A. Materiales de laboratorio**

- ✓ Vasos de precipitación pyrex de 1L.
- ✓ Papel filtro
- ✓ 4 Embudos plástico
- ✓ Tubo de ensayo
- ✓ 02 Pizetas de ½ L
- ✓ Mandil de laboratorio
- ✓ Guantes quirúrgicos.

**B. Reactivos**

- ✓ Ácido Cítrico

Tabla 3.

*Propiedades físico-químico del ácido cítrico*

Propiedades físico-químicas del ácido cítrico	
Fórmula molecular	$C_6H_8O_7$
Densidad	1665 kg/m <sup>3</sup>
Masa molar	192,13 g/mol
Solubilidad en agua	133 g/100 ml

Elaboración: Fuente propia

- ✓ Soda Cáustica
- ✓ Agua destilada

#### 2.2.4. Instrumentos

Los instrumentos y equipos fueron utilizados del laboratorio de procesamiento de minerales de la Universidad Nacional de Trujillo.

#### Equipos.

- ✓ Banco de celdas de agitación
- ✓ Horno secador Schemin
- ✓ Cuarteador Jones
- ✓ Tamiz malla #20 y #100
- ✓ ICP-OES marca Teledyne
- ✓ Centrífuga

- ✓ Chancadora de 3x4 pulg.
- ✓ Pulverizadora de anillos.
- ✓ Balanza analítica A&D  $\pm 0.0001$  g

#### **Instrumentos.**

- ✓ pH meter
- ✓ 03 probetas de 25 ml

### **2.2.5. Métodos**

#### **2.2.5.1. Método experimental:**

##### **A. Diseño experimental**

Su diseño es factorial de múltiples niveles. (Jiménez, 2012).

Tabla 4.

*Factores y niveles para el diseño experimental*

Factores	Niveles
Factor 1: pH	Nivel 1: 3
	Nivel 2: 4
	Nivel 3: 5
Factor 2: Granulometría	Nivel 1: Malla #20
	Nivel 2: Malla #100
Factor 3: Concentración	Nivel 1: 0,3
	Nivel 2: 0,4

Nivel 3: 0,5

---

Elaboración: Fuente propia

Nivel de factor 1: 3

Nivel de factor 2: 2

Nivel de factor 3: 3

Número de réplicas = 2

Nº de pruebas =  $3 \times 2 \times 3 = 18$  pruebas por réplica

Tabla 5

*Diseño experimental del porcentaje de extracción del Cu*

Granulometría						
Concentración (molar)	#20			#100		
	PH			PH		
	3	4	5	3	4	5
0,3	X1.1.1	X1.2.1	X1.3.1	X2.1.1	X2.2.1	X2.3.1
0,4	X1.1.2	X1.2.2	X1.3.2	X2.1.2	X2.2.2	X2.3.2
0,5	X1.1.3	X1.2.3	X1.3.3	X2.1.3	X2.2.3	X2.3.3

---

Elaboración: Fuente propia

Tabla 6.

*Desglose de Diseño experimental para el porcentaje de extracción del Cu*

Número de Pruebas	Granulometría	pH	Concentración Molar
1	#20	3	0,3
2	#100	3	0,3
3	#20	3	0,4
4	#100	3	0,4
5	#20	3	0,5
6	#100	3	0,5
7	#20	4	0,3
8	#100	4	0,3
9	#20	4	0,4
10	#100	4	0,4
11	#20	4	0,5
12	#100	4	0,5
13	#20	5	0,3
14	#100	5	0,3
15	#20	5	0,4
16	#100	5	0,4
17	#20	5	0,5
18	#100	5	0,5
19	#20	3	0,3
20	#100	3	0,3
21	#20	4	0,3
22	#100	4	0,3
23	#20	5	0,3
24	#100	5	0,3
25	#20	3	0,4
26	#100	3	0,4
27	#20	4	0,4
28	#100	4	0,4
29	#20	5	0,4
30	#100	5	0,4



31	#20	3	0,5
32	#100	3	0,5
33	#20	4	0,5
34	#100	4	0,5
35	#20	5	0,5
36	#100	5	0,5

---

Fuente: Elaboración propia

## **B. Equipo experimental**

En este proyecto se aplicó la prueba de lixiviación agitada con ácido cítrico (Centro de Artigos, 2012) para la extracción de Cu a partir de la calcantita.

Se tomó en cuenta los siguientes parámetros:

### **Granulometría**

Se consideró 18 muestras para malla #20 y 18 muestras para malla # 100.

### **Concentración del ácido cítrico**

Por antecedentes bibliográficos consideramos concentraciones de 0,3; 0,4 y 0,5 Molar.

### **PH**

Rangos de pH 3, 4 y 5.

Tabla 7.

*Parámetros que influyen en la extracción del Cu por lixiviación con ácido cítrico*

Parámetros	Niveles		
	Bajo	Medio	Alto
Granulometría	Malla #20	—	Malla #100
Concentración de ácido cítrico (M)	0,3	0,4	0,5
pH	3	4	5

Elaboración: Fuente propia

### Tiempo de lixiviación

El tiempo considerado fue de 40 min

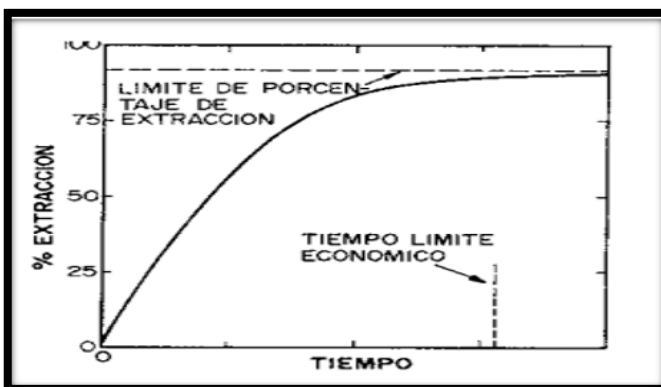


Figura 1. Porcentaje de extracción en función del tiempo.

Fuente: Domic, E. (2001)

### **Velocidad de agitación**

La velocidad que consideramos es de 275 rpm.

### **Número de pruebas**

Consideración de 36 pruebas (18 pruebas mallas #20 y 18 pruebas malla #100).

## **2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos**

### **2.3.1. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

La técnica utilizada fue la observación, es decir realizamos las pruebas en el laboratorio y luego las observamos. (Calduch, 2014). Manipulamos las tres variables independientes (pH, granulometría y concentración) y su influencia que tienen con la variable dependiente (extracción de Cu),

Los instrumentos utilizados fueron:

- Formato de porcentaje de extracción de Cu, brindados por el ICP-OES (Padilla, 2001) y balance metalúrgico.
- Formato de tabla de parámetros de operación de laboratorio.

### **2.3.2. Técnicas e instrumentos de análisis de datos**

Los instrumentos que se utilizaron fueron los cuadros de datos de Software MINITAB versión 17, formatos de datos obtenidos por el ICP-OES, gráficos, figuras y resultados de cálculos de balance metalúrgico y de análisis de varianza.

## 2.4. Procedimiento

### 2.4.1. Análisis químico del mineral

Se realizó el análisis químico completo del mineral en el laboratorio de procesamiento de minerales de la Universidad Nacional de Trujillo, antes de realizar las pruebas.

### 2.4.2. Preparación de la muestra

- ✓ Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de procesamiento de minerales de la Universidad Nacional de Trujillo.
- ✓ Se llevó los 15 kg de calcantita a chancado.
- ✓ Se colocó el sulfato de Cu de tipo calcantita en bandeja y se llevó al horno secador a una temperatura de 100 °C para eliminar la humedad. El tiempo que permaneció en el horno secador fue de 1 hora. Al retirar la bandeja del horno se lo colocó a temperatura ambiente por 24 horas.
- ✓ Se llevó el mineral al cuarteador Jones y se extrajo 6 kg de la muestra aproximadamente.
- ✓ Se obtuvo el porcentaje de humedad del mineral. (Eduardo, 2015).

$$\text{Ecuación 1. } w = \left( \frac{w_w}{w_s} \right) \times 100$$

Donde:

W= Contenido de humedad expresado en %

$w_w$ = Peso del agua existente en la masa del suelo

$w_s$ = Peso de las partículas sólidas

- ✓ Se llevó el mineral al pulverizador, hasta un tamaño óptimo para obtener la muestra a una granulometría de malla #20 y #100.
- ✓ Se pasó por el tamiz malla #20 y #100.
- ✓ Se volvió a cuartear la muestra hasta obtener 36 muestras de malla #20 y #100 de 100 g cada una.

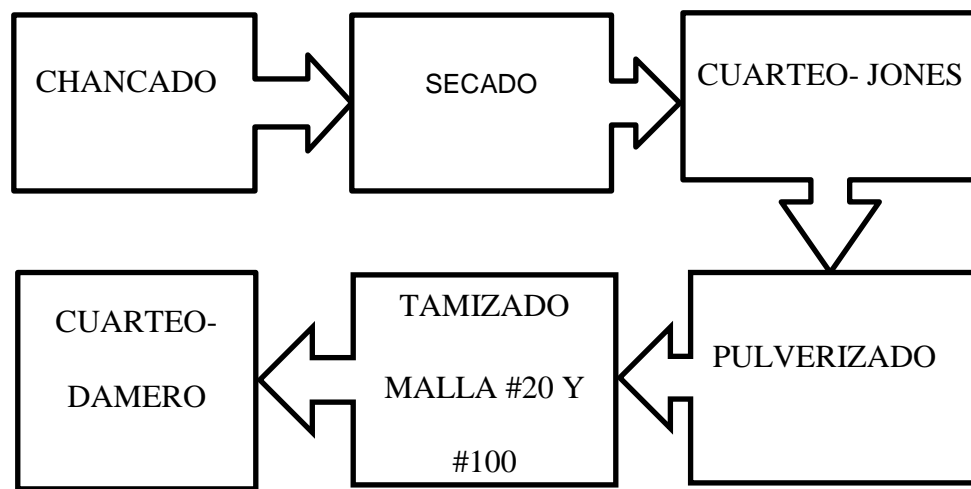


Figura 2. Diagrama de bloques del proceso que sigue el sulfato de Cu de tipo calcantita para la preparación de la muestra

#### 2.4.3.Preparación del mineral con la solución del ácido cítrico

- ✓ Se colocó cada muestra de malla #20 y #100 en un vaso de precipitación de 1 litro.
- ✓ Se colocó 200 ml de agua a cada vaso de precipitación con el respectivo peso del ácido cítrico cristalizado para diferentes concentraciones.
- ✓ Realizamos las concentraciones indicadas en nuestra variable de concentración de ácido cítrico (0,3; 0,4 y 0,5 molar).

- ✓ Realizamos los análisis para obtener los parámetros de nuestro pH (3, 4 y 5) usando soda cáustica para realizar la variación de pH, teniendo en cuenta que la muestra de calcantita tenía un pH = 3.
- ✓ Obtuvimos la densidad y porcentaje de sólidos en la pulpa.

$$\text{Ecuación 2. Densidad de la pulpa} = \frac{m_p}{v_p} = \frac{w_m + w_{H_2O}}{\frac{w_m}{\rho_m} + v_{H_2O}}$$

$$\text{Ecuación 3. \% sólidos} = \frac{w_m}{w_m + w_{H_2O}} \times 100$$

Tabla 8.

*Gramos de ácido cítrico para preparar 200 ml de solución a diferentes concentraciones*

Concentración de ácido cítrico (M)	Cantidad de ácido cítrico (g)
0,3	11,52
0,4	15,36
0,5	19,2

Elaboración: fuente propia

#### 2.4.4. Agitación en bancos de celda

El banco de celdas tuvo compartimientos para poder realizar 4 pruebas a la vez.

- ✓ La lixiviación en el banco de celdas se desarrolló a temperatura ambiente, por un tiempo de 40 minutos a una velocidad de 275 rpm.

#### 2.4.5. Filtrado de las muestras

- ✓ Se filtró cuidadosamente cada muestra lixiviada y se conservó cada papel filtro con su respectivo relave.

#### 2.4.6. Análisis por el ICP-OES y balance metalúrgico

- ✓ Se analizó por el ICP-OES la solución rica lixiviada y el relave para luego realizar el balance metalúrgico y determinar el porcentaje de extracción de cobre.

- **Análisis por el ICP**

- ✓ Obtención de ley de cabeza de Cu.
- ✓ Obtención de ley de Cu en la solución a diferente pH, granulometría y concentración.

- **Balance metalúrgico**

- ✓ Cálculos para la extracción del porcentaje del Cu:

**Ecuación 4.**

$$\text{Extracción de Cu \%} = \frac{\text{contenido de finos de Cu en la solución}}{\text{contenido de fino de Cu en la cabeza}} \times 100$$

**Ecuación 5.**

$$\text{Contenido de finos de Cu (kg) en la solución} = \frac{\text{peso (kg)} \times \text{ley Cu}}{100}$$

**Ecuación 6.**

$$\text{Contenido de finos de Cu (kg) en la cabeza} = \frac{\text{peso (kg)} \times \text{ley Cu}}{100}$$

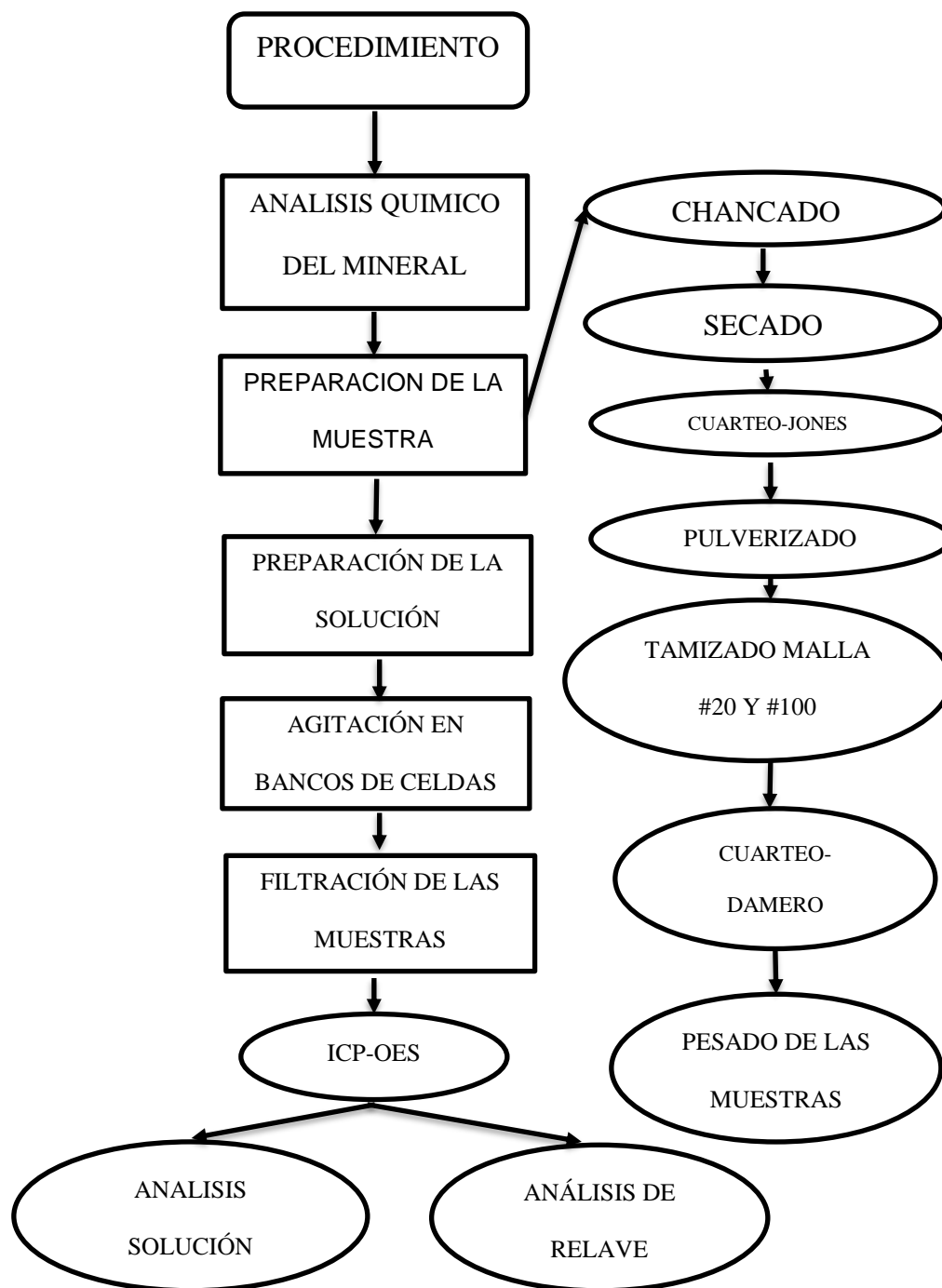


Figura 3. Diagrama de bloques del proceso general que sigue el sulfato de Cu de tipo calcantita para la extracción del porcentaje del Cu.



### CAPÍTULO III. RESULTADOS

Después de haber realizado y analizado las 36 pruebas experimentales de lixiviación (18 pruebas de granulometría malla #20 y 18 pruebas de granulometría malla #100) del sulfato de Cu de tipo calcantita, se pudo determinar el pH, la granulometría y la concentración del ácido cítrico para el mayor porcentaje de extracción de cobre.

Tabla 9.

*Parámetros de operación*

Mineral	Calcantita
<b>Peso del mineral</b>	100 g
<b>Ley de cabeza</b>	6.31 %
<b>Volumen de solución (ml)</b>	200 ml
<b>Granulometría</b>	Malla #20 y #100
<b>Proceso</b>	Cinético
<b>Tiempo de agitación</b>	40 minutos
<b>Velocidad de agitación</b>	275 rpm
<b>Porcentaje de sólidos en la pulpa</b>	33 %
<b>Densidad de la pulpa</b>	1,22 g/cm <sup>3</sup>
<b>Porcentaje de humedad del mineral</b>	60%

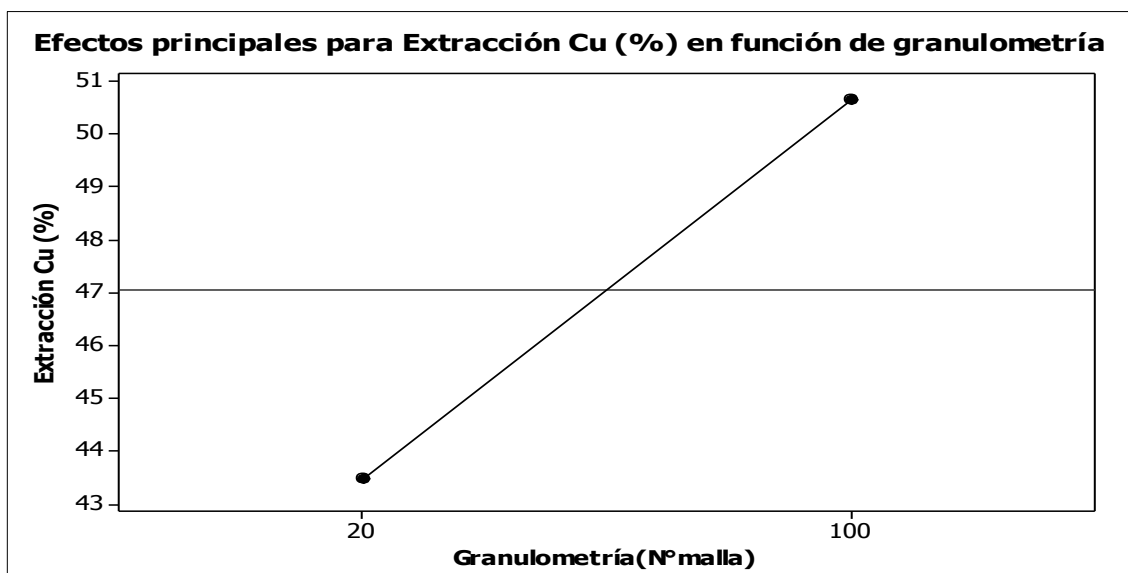
Fuente: Elaboración propia

Tabla 10.

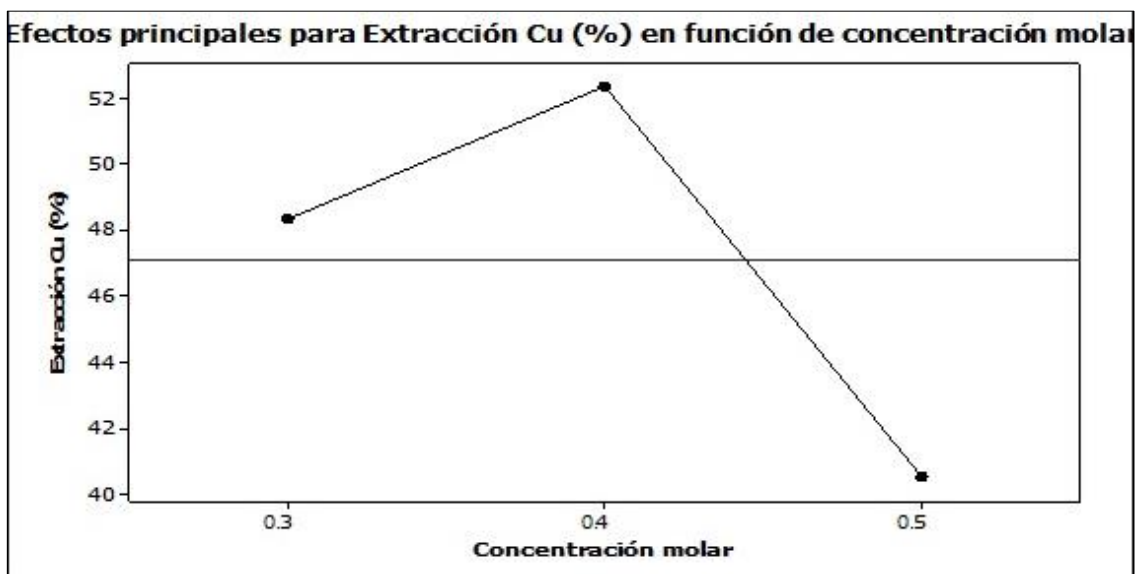
*Resultados de porcentaje de extracción de Cu según análisis de ICP-OES y balance metalúrgico*

N°	pH	Concentración molar (mol)	Granulometría	Concentración (ppm Cu)	Ley Cu (%)	Extracción Cu (%)
1	3	0,3	20	22423.18	2.242	71.07
2	3	0,3	100	22311.34	2.231	70.71
3	3	0,4	20	31175.49	3.118	98.81
4	3	0,4	100	31258.02	3.126	99.08
5	3	0,5	20	30210.11	3.021	95.75
6	3	0,5	100	26942.04	2.694	85.39
7	4	0,3	20	20362.55	2.036	64.54
8	4	0,3	100	12423.74	1.242	39.38
9	4	0,4	20	13911.01	1.391	44.09
10	4	0,4	100	15793.83	1.579	50.06
11	4	0,5	20	3457.09	0.346	10.96
12	4	0,5	100	10070.15	1.007	31.92
13	5	0,3	20	4966.35	0.497	15.74
14	5	0,3	100	1829.13	0.183	5.79
15	5	0,4	20	2253.45	0.225	7.14
16	5	0,4	100	4552.51	0.455	14.43
17	5	0,5	20	3079.36	0.308	9.76
18	5	0,5	100	4352.356	0.435	13.79
19	3	0,3	20	24255.82	2.426	76.88
20	3	0,3	100	22807.05	2.281	72.29
21	3	0,4	20	31125.8	3.113	98.66
22	3	0,4	100	31217.4	3.122	98.95
23	3	0,5	20	29780	2.978	94.39
24	3	0,5	100	25795.8	2.58	81.76
25	4	0,3	20	19874.2	1.987	62.99
26	4	0,3	100	13241.2	1.324	41.97
27	4	0,4	20	13469.8	1.347	42.69
28	4	0,4	100	15643.5	1.564	49.58
29	4	0,5	20	3875.7	0.388	12.28
30	4	0,5	100	20802.3	2.08	65.93
31	5	0,3	20	5816.4	0.582	18.44
32	5	0,3	100	2631.5	0.263	8.34
33	5	0,4	20	3126.4	0.313	9.91
34	5	0,4	100	4748.7	0.475	15.05
35	5	0,5	20	3098.3	0.31	9.82
36	5	0,5	100	3964.4	0.396	12.57

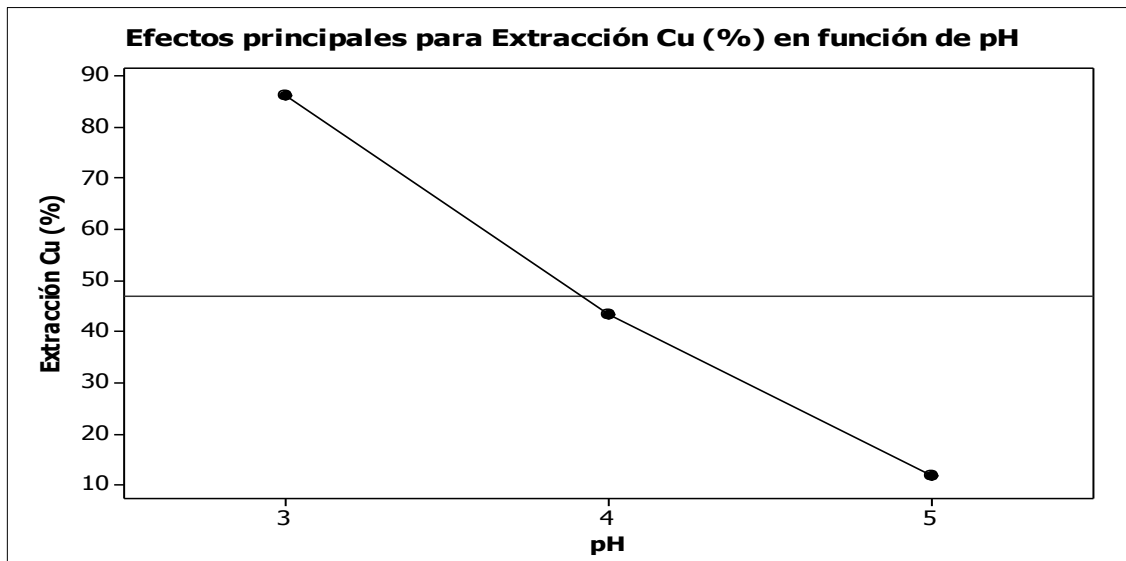
Fuente: Elaboración propia



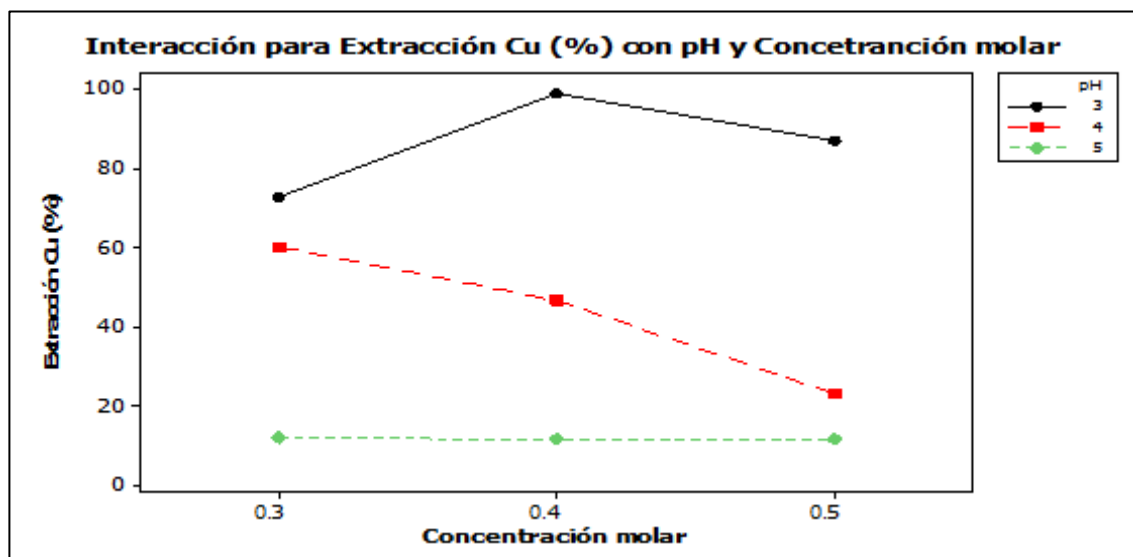
**Figura 4.** Gráfica de la curva de variación del porcentaje de la extracción del cobre en función de la granulometría del mineral.



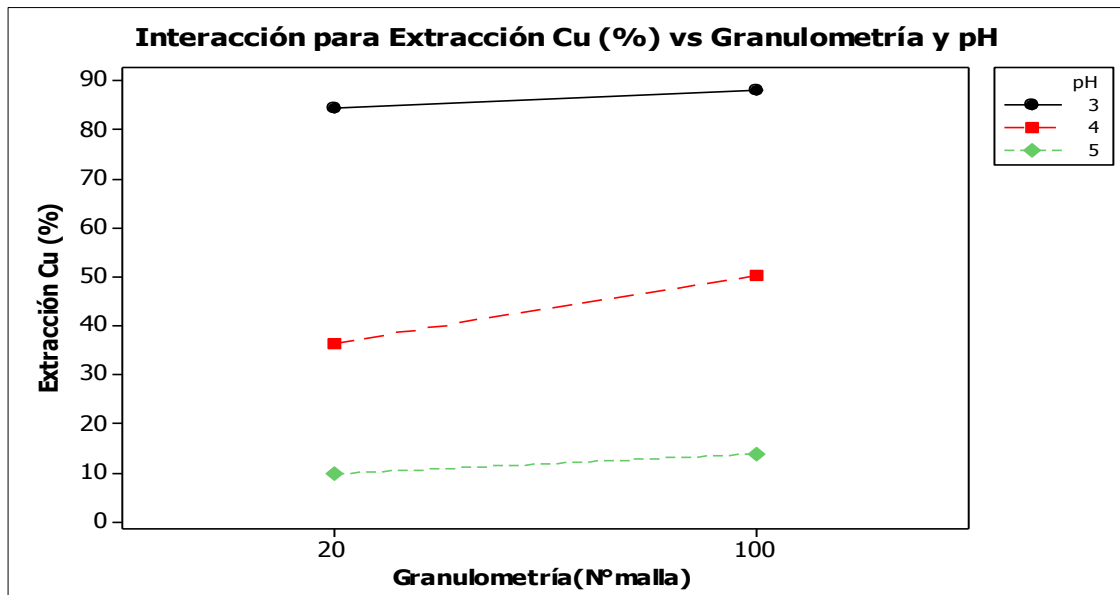
**Figura 5.** Gráfica de la curva de variación del porcentaje de la extracción del cobre en función de la concentración molar del ácido cítrico.



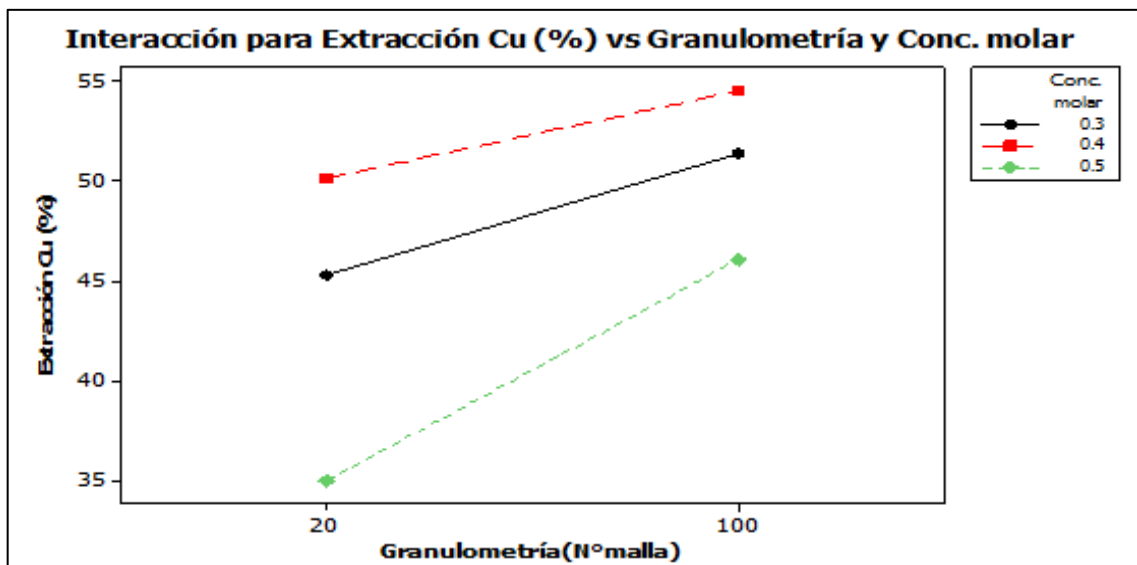
**Figura 6.** Gráfica de la curva de variación del porcentaje de la extracción del cobre en función de diferentes niveles de pH.



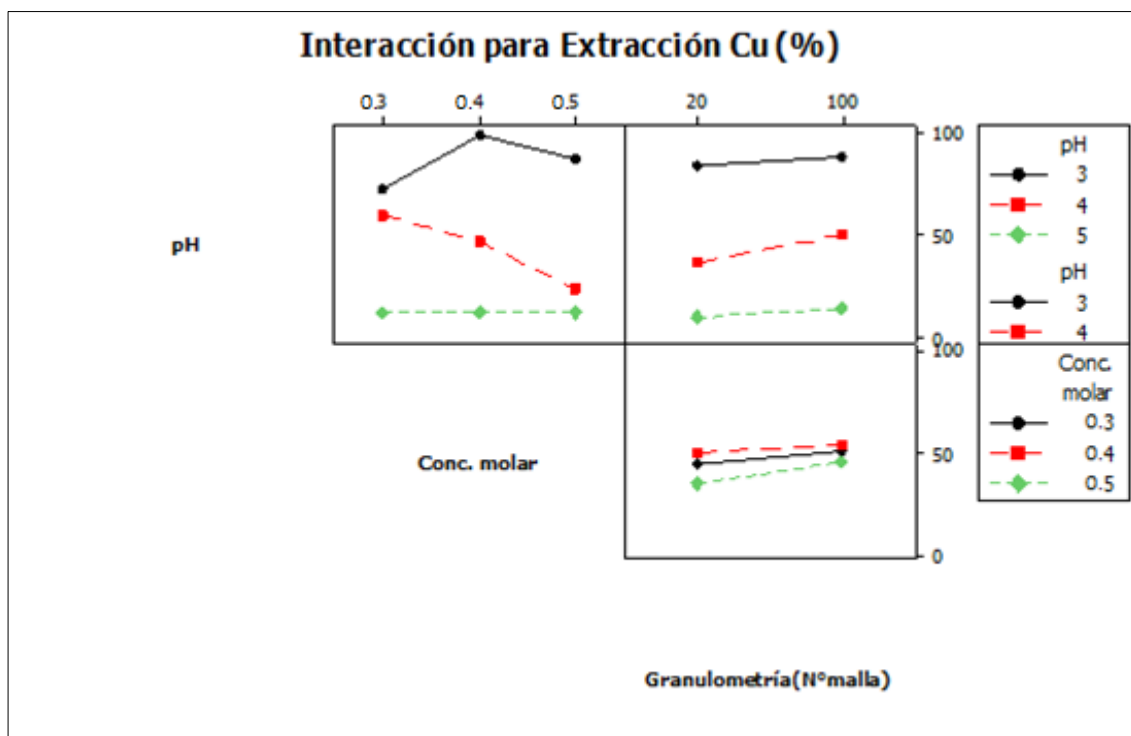
**Figura 7.** Gráfica de la curva de variación del porcentaje de la extracción del cobre en función de la concentración del ácido cítrico a diferentes niveles de pH



**Figura 8.** Gráfica de la curva de variación del porcentaje de la extracción del cobre en función de la granulometría a diferente número de malla y diferentes niveles de pH.



**Figura 9.** Gráfica de la curva de variación de la extracción de cobre en función de la granulometría a diferente número de malla y diferente concentración molar del ácido cítrico.



**Figura 10.** Gráfica de la curva de variación del porcentaje de extracción del cobre en función de la granulometría a diferente número de malla, diferente concentración molar del ácido cítrico y diferentes niveles de pH.

Tabla 11.

*Resultados del análisis de varianza para el % de extracción de Cu a diferente pH, granulometría y concentraciones de ácido cítrico.*

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	p
pH	$(a-1) = 3-1 = 2$	33500.7	16750.3	761.68	0.000
Concentración Molar	$(b-1) = 3-1 = 2$	865.2	432.6	19.67	0.000
Granulometría	$(c-1) = 2-1 = 1$	464.3	464.3	21.11	0.000
Interacción	$(a-1)(b-1) =$	3301.0	825.2	37.53	0.000
pH y concentración	$(2)(2) = 4$				
Interacción	$(a-1)(c-1) =$	194.2	97.1	4.41	0.028
pH y granulometría	$(2)(1) = 2$				
Interacción	$(b-1)(c-1) =$	73.2	36.6	1.66	0.217
Concentración y granulometría	$(2)(1) = 2$				
Interacción	$(a-1)(b-1)(c-1) =$	98.2	24.6	1.12	0.379
pH, concentración y granulometría	$(2)(2)(1) = 4$				
Error	$(abc)(r-1) =$	395.8	22.0		
	$(3)(3)(2)(1) = 18$				
Total	$(abcr)-1 =$	38892.6			
	$(3)(3)(2)(2) - 1 = 35$				

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1. Discusión

En la figura 4 podemos observar la variación de la curva del porcentaje de la extracción del cobre en función de la granulometría malla #20 y #100, donde se obtiene un mayor porcentaje de la extracción de Cu a malla #100, lo que quiere decir que a un menor tamaño de partícula se obtiene mayor extracción.

En la figura 5 podemos observar la curva de variación del porcentaje de la extracción del Cu a concentración molar 0,3; 0,4 y 0,5 Molar de ácido cítrico, en la cual se obtiene un mayor porcentaje de extracción de Cu a concentración de 0,4 Molar de ácido cítrico, siendo el óptimo y a 0,5 Molar disminuye considerablemente.

En la figura 6 podemos observar la curva de variación del porcentaje de la extracción del Cu a diferentes niveles de pH de 3, 4 y 5, donde podemos apreciar que a pH = 3 obtenemos una mayor extracción de Cu, es decir que a menor pH mayor extracción de Cu y se asegura la formación del citrato de cobre.

En la figura 7 podemos observar la curva de variación del porcentaje de la extracción del cobre a concentración 0,3; 0,4 y 0,5 Molar de ácido cítrico con niveles de pH de 3, 4 y 5, por lo que deducimos que a una concentración de 0,4 molar y pH = 3, obtenemos un mayor porcentaje de extracción de Cu.



Según Ligan y Lucano (2014), que lixiviaron crisocola con ácido cítrico, determinaron la influencia del pH = 3 siendo el más óptimo, y una concentración de 0,4 Molar para una mayor recuperación de Cu, afirmando que ambas variables interaccionan entre sí. En la figura 7 podemos observar que a un pH = 3 y concentración de 0,4 Molar de ácido cítrico obtenemos una mayor extracción de Cu que coincide con la investigación de Ligan y Lucano, pero con otro mineral.

En la figura 7 también se observa que a pH = 4 la extracción declina debido a que los quelatos se forman a pH = 3 y a medida que este aumenta el cobre se va precipitando, también el diagrama de Pourbaix nos demuestra que el  $Cu^{+2}$  se forma a pH ácido hasta un máximo de 4.5. Cuando se llega a 0.4 molar se alcanza la mayor extracción debido a que el pH interacciona con la concentración. Esto demuestra que a pH = 5 se obtiene la más baja extracción de cobre.

En la figura 8 podemos observar la curva de variación del porcentaje de extracción de cobre a granulometría de malla #20 y #100 con niveles de pH de 0,3; 0,4 y 0,5. En esta gráfica podemos deducir que a un menor tamaño de partícula y pH = 3 obtenemos mayor porcentaje aproximado al 90 % de extracción del cobre, que corrobora con las leyes de conminución de minerales que a menor tamaño de partícula mayor liberación de partícula valiosa, por lo tanto mayor área de exposición y por ende mayor extracción por lixiviación.

Según Chucos y Quispe (2016), que lixiviaron cuprita con ácido cítrico, determinaron que a una granulometría de malla #100,  $\text{pH} = 2$  y concentración de 0,4 molar de ácido cítrico obtuvieron una recuperación de Cu de 80.78%. En la figura 8 podemos observar que a menor tamaño de partícula y a medida que el pH aumenta hasta  $\text{pH} = 4$  obtenemos una mayor extracción de Cu.

En la figura 9 podemos observar la curva de variación de la extracción del Cu a granulometría de malla #20 y #100 con diferente concentración de 0,3; 0,4 y 0,5 Molar de ácido cítrico. En esta gráfica podemos deducir que a menor tamaño de partícula y concentración de 0,4 molar de ácido cítrico obtenemos una mayor extracción de porcentaje aproximadamente del 55 % de Cu.

En la figura 10 podemos observar la curva de variación del porcentaje de extracción de Cu a partir de la granulometría de malla #20 y #100 con niveles de pH de 3, 4 y 5 y concentración de 0,3; 0,4 y 0,5 Molar de ácido cítrico. En esta gráfica podemos deducir que a un menor tamaño de partícula (malla #100),  $\text{pH} = 3$  y concentración de 4 molar de ácido cítrico obtenemos un 99 % de extracción de Cu.

En la tabla 11 podemos observar según el análisis de varianza que los efectos de las variables: pH, concentración molar y granulometría; así como la interacción de las variables pH y concentración molar, pH y granulometría tienen una influencia

significativa en la extracción de cobre a partir de un mineral de calcantita. Y para la interacción concentración molar y granulometría, así como la interacción de las tres variables presentan un P value mayor a 0.05, por lo que estas variables no influyen significativamente en la extracción de cobre a partir de un mineral de calcantita.

## 4.2 Conclusiones

Se obtiene un 99 % de extracción de cobre mediante la lixiviación por agitación a un tamaño de partícula pasante malla #100 (150  $\mu\text{m}$ ), concentración de 0,4 molar de ácido cítrico y  $\text{pH} = 3$ .

La concentración molar de ácido cítrico influye en la extracción de cobre usando una concentración de 0,4 molar, donde se obtiene el mayor porcentaje de extracción de cobre a partir de la calcantita.

La granulometría influye en la extracción de cobre usando un menor tamaño de partícula pasante la malla #100 es la más óptima, en donde se obtiene el mayor porcentaje de extracción de cobre a partir de la calcantita.

El pH influye en la extracción de cobre usando ácido cítrico siendo el más óptimo  $\text{pH} = 3$  donde se obtiene el mayor porcentaje de extracción de cobre a partir de la calcantita.

Dado que, a un nivel de significancia de 0.05, para los efectos de las variables: pH, concentración molar, granulometría, y la interacción de pH con concentración molar.

Como los valores de  $F_0$  exceden sus valores tabulares (crítico) a sus respectivos grados de libertad, así como que P-Value es menor a 0.05, por lo que existe evidencia empírica suficiente para rechazar la hipótesis nula; lo que nos lleva a concluir que, los efectos de las variables: pH, concentración molar y granulometría; así como la interacción de pH y concentración molar, pH y granulometría tienen una influencia significativa en la extracción de cobre a partir de un mineral de calcantita. Y para la interacción concentración molar y granulometría, así como la interacción de las tres variables presentan un P value mayor a 0.05, por lo que estas variables no influyen significativamente en la extracción de cobre a partir de un mineral de calcantita.

## REFERENCIAS

- Alejos, A., Cáceres, D., y Neire, F. (2017). Informe de salida de campo Compañía Minera Santa Luisa. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/349804324/Informe-Minera-Santa-Luisa-Huanzala>.
- Alfaro, A. (2002). *Introducción al Muestreo Minero*. Recuperado de [https://www.academia.edu/7802013/Introducci%C3%B3n\\_al\\_Muestreo\\_Minero](https://www.academia.edu/7802013/Introducci%C3%B3n_al_Muestreo_Minero).
- Calduch, R. (2014). *Métodos y técnicas de investigación internacional*. Recuperado de <https://www.ucm.es/data/cont/docs/835-2018-03-01-Metodos%20y%20Tecnica%20de%20Investigacion%20Internacional%20v2.pdf>.
- Centro de Artigos. (2012). Ácido cítrico. Recuperado de [http://ww38.centrodeartigos.com/articulos-utiles/article\\_104723.html%3E](http://ww38.centrodeartigos.com/articulos-utiles/article_104723.html%3E).
- Chucos, R., & Espinoza, Y. (2016). *Influencia del pH y la concentración del ácido cítrico en la recuperación de cobre mediante lixiviación por agitación de*

*minerales oxidados del tipo cuprita* (Tesis pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.

Cordova, J. & Campos, E. (2016). *“Influencia del tipo y concentración del agente lixivante en la extracción de cobre mediante lixiviación por agitación de un mineral tipo Crisocola”* (Tesis pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.

Domic, E (2001). *“Hidrometalurgia: Fundamentos, Procesos y Aplicaciones”*. Santiago, Chile. Santiago de Chile.

Eduardo, R. (2015). *Evaluación Metalúrgica de Lixiviación con Ácido Sulfúrico de mineral oxidado de cobre de la mina Antapaccay para optimizar su comportamiento frente a los parámetros controlados de altura y curado* (Tesis pregrado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.

Espinosa, M., & Ludeña, K. (2007). *“Lixiviación Fúngica de Cobre a partir de Minerales del Distrito Minero Portovelo – Zaruma – Minas Nuevas”* (Tesis pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador.

Günter, J. (2001). *“Copper, Its Trade, Manufacture, Use, and Enviromental Status,”*

Michigan, Estados Unidos: ASM International.

Jiménez, R. (2012). Estadística Inferencial II. Recuperado de

[https://www.academia.edu/18242976/ESTADISTICA\\_INFERENCIAL\\_II\\_LIBRO?auto=download](https://www.academia.edu/18242976/ESTADISTICA_INFERENCIAL_II_LIBRO?auto=download).

Klein, C. & Hurlbut, C. (1997). *Manual de mineralogía (basado en la obra de J.D. Dana)* 4ªed. Madrid, España: Reverté.

Lingan, R. & Lucano, R. (2014). *“Influencia del pH y la concentración del ácido cítrico en la lixiviación por agitación de minerales oxidados de cobre tipo crisocola del distrito de Salpo – La Libertad”* (Tesis pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú

Medina, J. (2016). *“Influencia del pH y la Concentración del Ácido Cítrico en La Extracción de Cobre Mediante Lixiviación por Agitación De Minerales Oxidados de Cobre Tipo Crisocola Del Distrito De Salpo- La Libertad”*. Tesis pregrado. Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.

Ministerio de Energía y Minas (2018). “*Exportaciones de Cobre representaron el 30% de las ventas del Perú en el 2018*”. Recuperado de <http://mineriaenergia.com/snmpe-exportaciones-de-cobre-representaron-30-de-las-ventas-del-peru-en-el-2018/>.

Padilla, I. (2001). Evaluación y Desarrollo de Metodologías para la determinación de elementos traza en aceros por ICP-MS (Tesis pregrado). Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

Rodríguez, A. (14 de junio de 2012). Solicitud Internacional publicada en virtud del Tratado de Cooperación en materia de patentes. “*Proceso para lixiviar óxido de cobre reemplazando ácido sulfúrico por un agente orgánico lixivante no contaminante*”. Recuperado de <https://patentimages.storage.googleapis.com/17/d9/d3/2559ec77a2fab/WO2012075596A1.pdf>

Tam, J., Vera, G., Oliveros, R. (2008). *Métodos y estrategias de investigación científica*. Recuperado de [http://www.imarpe.pe/imarpe/archivos/articulos/imarpe/oceanografia/adj\\_mode\\_la\\_pa-5-145-tam-2008-investig.pdf](http://www.imarpe.pe/imarpe/archivos/articulos/imarpe/oceanografia/adj_mode_la_pa-5-145-tam-2008-investig.pdf).



## ANEXOS

## ANEXO I

### **Cálculo de la cantidad teórica de ácido cítrico requerido para la lixiviación**

#### **Datos:**

- Ley de Cu en el mineral calcantita = 6.31%
- Peso molecular  $C_6H_8O_7 = 192.13 \text{ g/mol}$

Si:

1 Mol de ácido cítrico = 192 g

0.3 Mol de ácido cítrico = 57.6 g

Entonces:

1 litro de solución = 57.6 g

0.2 litro de solución = 11.52 g

## ANEXO II

### Calculo del porcentaje de humedad del Cu

$$w = \left( \frac{w_w}{w_s} \right) \times 100$$

Donde:

W= Contenido de humedad expresado en %

$w_w$ = Peso del agua existente en la masa del suelo

$w_s$ = Peso de las partículas sólidas

$$w = \left( \frac{9 \text{ kg}}{15 \text{ kg}} \right) \times 100$$

$$w = 60 \%$$

### Cálculo de la densidad de pulpa y porcentaje de sólidos

Datos experimentales

- Peso del mineral ( $W_m$ ) = 100 g
- Volumen de agua ( $W_{H_2O}$ ) = 200 cm<sup>3</sup>
- Densidad del mineral ( $\rho_m$ ) = 2.21 g/cm<sup>3</sup>

Cálculo de la densidad de pulpa:

$$\tau = \frac{m_p}{v_p} = \frac{W_m + W_{H_2O}}{\frac{W_m}{\rho_m} + V_{H_2O}}$$

$$\tau = \frac{100 \text{ g} + 200 \text{ g}}{\frac{100 \text{ g}}{2.21 \text{ g/cm}^3} + 200 \text{ cm}^3}$$

$$\tau = 1.22 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo del porcentaje de sólidos en la pulpa:

$$\% \text{ sólidos} = \frac{W_m}{W_m + W_{H_2O}} * 100$$

$$\% \text{ sólidos} = \frac{100 \text{ g}}{100 \text{ g} + 200 \text{ g}} * 100$$

$$\% \text{ sólidos} = 33.3 \%$$

### ANEXO III

#### CÁLCULO DEL % DE EXTRACCIÓN DE COBRE ENSAYADA Y CALCULADA PARA CADA CONCENTRACIÓN MOLAR DE ÁCIDO CÍTRICO Y CADA pH.

Si tenemos el mineral tipo calcantita con una ley de Cu de 6.31 %, por lo tanto, en 100 g. de mineral habrá 6.31 g. de cobre.

##### % Extracción de Cobre Ensayada:

$$\% \text{ Extracción de Cu Ensayada} = \frac{\text{Contenido Fino de Cu en la solución rica}}{\text{Contenido fino de Cu en la Cabeza general}} * 100$$

Entonces:

$$\checkmark \text{ Contenido de finos de Cu(kg) en la solución} = \frac{\text{peso (kg)} \times \text{ley Cu}}{100}$$

$$\text{Contenido de finos de Cu(kg) en la solución} = \frac{0.2 \text{ kg} \times 3.146}{100}$$

$$\text{Contenido de finos de Cu(kg) en la solución} = 0.006292 \text{ kg}$$

$$\checkmark \text{ Contenido de finos de Cu (kg) en la cabeza} = \frac{\text{peso (kg)} \times \text{ley Cu}}{100}$$

$$\text{Contenido de finos de Cu (kg) en la cabeza} = \frac{0.1 \text{ kg} \times 6.31}{100}$$

$$\text{Contenido de finos de Cu (kg) en la cabeza} = 0.00631 \text{ kg}$$

*Por lo tanto:*

$$\% \text{ Extracción de Cu Ensayada} = \frac{\text{Contenido Fino de Cu en la solución rica}}{\text{Contenido fino de Cu en la Cabeza general}} * 100$$

$$\% \text{ Extracción de Cu Ensayada} = \frac{0.00629 \text{ kg}}{0.00631 \text{ kg}} * 100$$

$$\% \text{ Extracción de Cu Ensayada} = 99 \%$$

## ANEXO IV

### BALANCE METALÚRGICO

Prueba 1	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	2.242	0.004484636	71.072

Prueba 2	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	2.231	0.004462268	70.717

Prueba 3	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	3.118	0.006235098	98.813

Prueba 4	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	3.206	0.006411604	101.610

Prueba 5	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	3.021	0.006042022	95.753

Prueba 6	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	2.694	0.005388408	85.395

Prueba 7	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	2.036	0.00407251	64.541

Prueba 8	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	1.242	0.002484748	39.378

Prueba 9	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	1.391	0.002782202	44.092

Prueba 10	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	1.579	0.003158766	50.060

Prueba 11	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	0.346	0.000691418	10.957

Prueba 12	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	1.007	0.00201403	31.918



Prueba 13	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	0.497	0.00099327	15.741

Prueba 14	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	0.183	0.000365826	5.798

Prueba 15	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	0.225	0.00045069	7.142

Prueba 16	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	0.455	0.000910502	14.430

Prueba 17	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	0.435	0.000870934	13.802

Prueba 18	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	0.307	0.000614982	9.746

Prueba 19	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	2.426	0.004851164	76.881

Prueba 20	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	2.281	0.00456141	72.289

Prueba 21	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	3.146	0.006292492	99.723

Prueba 22	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	1.880	0.003759032	59.573

Prueba 23	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	1.544	0.003088082	48.939

Prueba 24	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	2.080	0.004160456	65.934

Prueba 25	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	0.111	0.000222372	3.524

Prueba 26	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	0.092	0.0001834	2.906

Prueba 27	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	0.164	0.000328962	5.213

Prueba 28	Peso (Kg)	Leyes Cu (%)	Contenido metálico (Kg)	Extracción Cu (%)
cabeza	0.1	6.31	0.00631	
solución 40 min	0.2	0.064	0.00012885	2.042

## ANEXO IV

### ANÁLISIS DE VARIANZA (SOFTWARE MINITAB VERSIÓN 17)

#### Diseño factorial de múltiples niveles

Factores	: 3	Réplicas	: 2
Corridas base	: 18	Total de corridas	: 36
Bloques base	: 1	Total de bloques	: 1

Factor	Tipo	Niveles	Valores
pH	fijo	3	3, 4, 5
Conc. molar	fijo	3	3, 4, 5
Granulometría(Nºmalla)	fijo	2	20, 100

#### Análisis de varianza para Extracción Cu (%),

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F
pH	2	33500.7	33500.7	16750.3	761.68
Conc. molar	2	865.2	865.2	432.6	19.67
Granulometría(Nºmalla)	1	464.3	464.3	464.3	21.11
pH*Conc. molar	4	3301.0	3301.0	825.2	37.53
pH*Granulometría(Nºmalla)	2	194.2	194.2	97.1	4.41
Conc. molar*Granulometría(Nºmalla)	2	73.2	73.2	36.6	1.66
pH*Conc. molar* Granulometría(Nºmalla)	4	98.2	98.2	24.6	1.12
Error	18	395.8	395.8	22.0	
Total	35	38892.6			

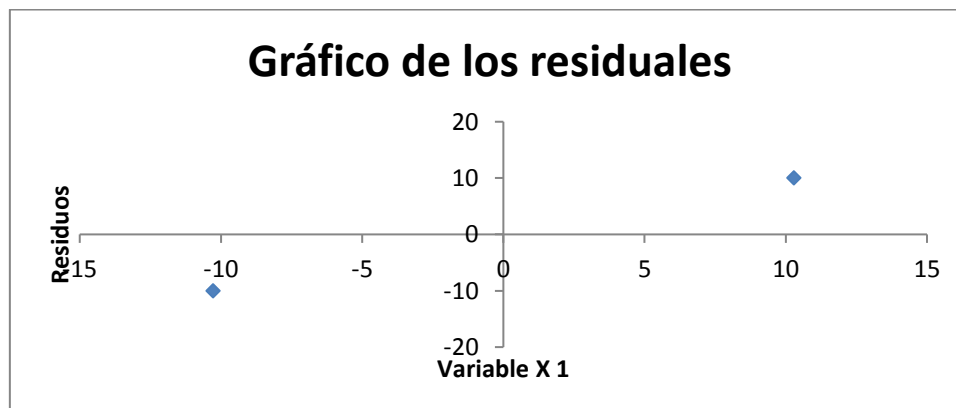
## PRUEBA DE HIPÓTESIS

Fuente	P
pH	0.000
Conc. molar	0.000
Granulometría(Nºmalla)	0.000
pH*Conc. molar	0.000
pH*Granulometría(Nºmalla)	0.028
Conc. molar*Granulometría(Nºmalla)	0.217
pH*Conc. molar* Granulometría(Nºmalla)	0.379
Error	
Total	

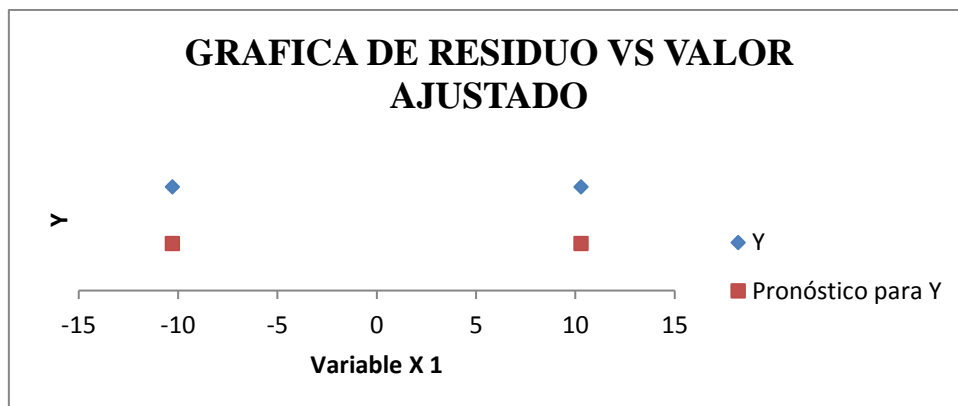
S = 4.68948    R-cuad. = 98.98%    R-cuad. (Ajustado) = 98.02%

## ANÁLISIS DE LOS RESIDUALES

Observación	Pronóstico para Y	Residuos	Residuos estándares
7	3.316	10.2826	3.1
25	3.316	-10.2826	-3.1



**Figura A4.1.** En esta gráfica se muestra una tendencia lineal, lo que significa una distribución normal de residuos.



**Figura A4.2.** En esta gráfica de residuo versus valor ajustado, podemos observar que no se sigue un patrón establecido puesto que existe independencia de errores.

## ANEXO V

### Diagrama de Pourbaix para el sistema Cu - $H_2O$

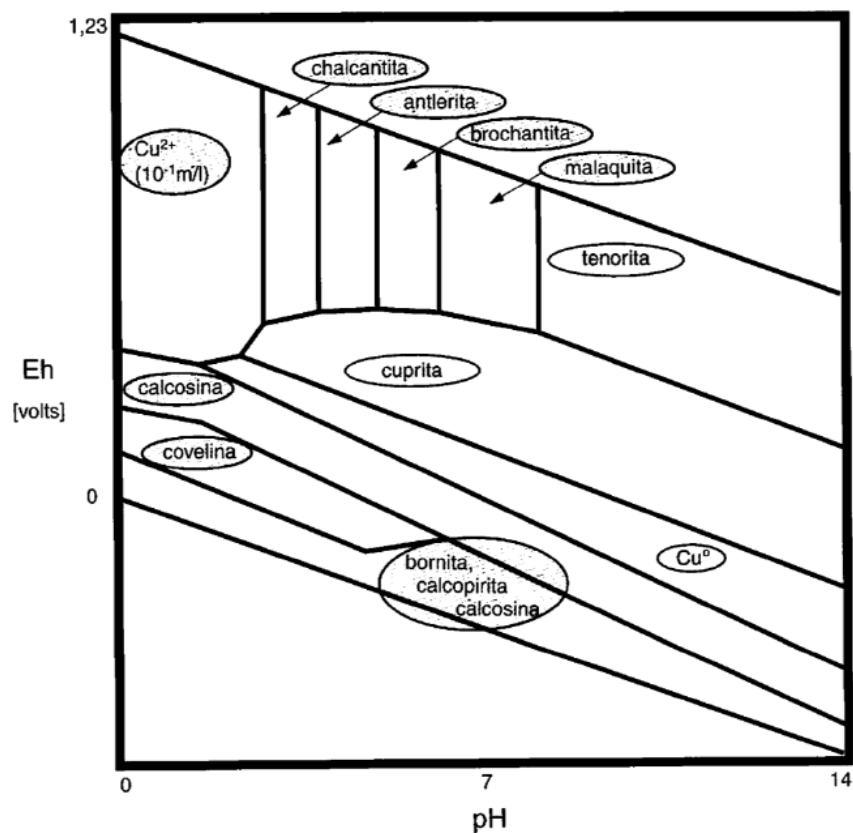


Figura que muestra que la calcantita se forma a pH ácido

## ANEXO VI

### PARTE EXPERIMENTAL DEL PROCESAMIENTO DEL MINERAL CALCANTITA

**FOTO N° 1. MINERAL TIPO CALCANTITA**



**FOTO N° 2. SECADO DEL MINERAL**



**FOTO N° 3. MINERAL SECADO**



**FOTO N° 4. CONMINUCIÓN DEL MINERAL**





**FOTO N° 5. CONMINUCIÓN DE LA MUESTRA A MALLA #100 EN LA PULVERIZADORA**



**FOTO N° 6. MUESTRAS DE 100 G**



**FOTO N° 7. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA**



**FOTO N° 8. BANCO DE AGITADORES, 245 RPM POR UN TIEMPO DE 40 MINUTOS**



**FOTO N° 9. COLOCACIÓN DE CADA PRUEBA EN EL BANCO DE AGITACIÓN**



**FOTO N° 10. ANÁLISIS  
EXPERIMENTAL**



**FOTO N° 11. CALIBRACIÓN  
DEL PH CON SOLUCIÓN  
DE SODA CAUSTICA**



**FOTO N° 12. FILTRADO DESPUÉS DE LA LIXIVIACIÓN**



**FOTO N°13. OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS PARA EL ANÁLISIS DE ICP**

